

# Impacto del diseño urbano en la calidad del aire: modelos arquitectónicos urbanos basados en espacios exteriores confinados

Miguel Ángel PADILLA-MARCOS (1) & Alberto MEISS (2)  
& Jesús FEIJÓ-MUÑOZ (3)

(1) PhD Arquitecto. Universidad de Valladolid

(2) PhD Arquitecto. Universidad de Valladolid

(3) PhD Arquitecto. Universidad de Valladolid

**RESUMEN:** El flujo del aire entre edificios a través de los espacios exteriores condiciona su calidad mediante el consecuente proceso continuado de contaminación. Parámetros como la densidad de población, la presencia de industrias o el tráfico influyen notablemente sobre el proceso de degradación del aire. Se propone un método numérico validado experimentalmente capaz de evaluar la idoneidad de un diseño urbano con respecto a su capacidad para proveer al interior de los edificios la calidad del aire óptima para sus ocupantes a través de los espacios exteriores confinados. Se definen 8 posibles espacios exteriores según su posición con respecto a los elementos construidos, acotándose lateralmente por los planos envolventes de los edificios contiguos y cuya elevación asciende hasta la cota de cornisa. Este trabajo se ha centrado en buscar un procedimiento capaz de analizar la calidad del aire exterior según el tiempo que pasa desde que accede al entorno urbano en una situación ideal de pureza y el tiempo que tarda en ser suministrado a los edificios. En general, los resultados alcanzados demuestran que los espacios exteriores confinados que se encuentran expuestos a la acción eólica tienen mayor predisposición a reducir la edad media del aire que contienen. Para los casos analizados, puede obtenerse una mejora considerable, de hasta el 78,68% en la calidad del aire que se recibe en los edificios desde los espacios exteriores confinados, atendiendo a criterios de exposición al viento en relación a su forma y densidad urbana.

**DESCRIPTORES:** Calidad del aire. Espacio exterior confinado. CFD. Densidad urbana. Eficiencia de la renovación.

Recibido: 15.01.2017; Revisado: 21.02.2017

Correo electrónico: miguelangel.padilla@uva.es; meiss@arq.uva.es; feijo@arq.uva.es

Los autores agradecen los comentarios y sugerencias realizados por los evaluadores anónimos, que han contribuido a mejorar y enriquecer el manuscrito original.

## Impact of urban design on air quality: urban architectural models based on confined outdoor spaces

**ABSTRACT:** The flow of air between buildings through outdoor spaces determines its quality through the resulting on-going process of pollution. Parameters such as population density, the presence of industries or traffic significantly influence the air degradation process. An experimentally validated numerical method able to assess the suitability of an urban design with regard to its capacity to provide the interior of buildings with optimum air quality for those inside through confined outdoor spaces is proposed. Eight possible outdoor spaces have been defined in accordance with their position with regard to built up elements, being laterally delimited by the enveloping planes of adjoining buildings and whose height is defined by the level of the cornice. This work has focused on finding a procedure able to analyse outside air quality according to the time that elapses from when it accesses the urban surroundings in an ideal state of purity and the time that it takes to be supplied to buildings. In general, the results obtained show that confined outside areas exposed to wind action have a greater propensity to reduce the average age of the air they contain. In the cases analysed, it was possible to achieve a considerable improvement. An increase in quality of up to 78.68% was shown for the air received in the buildings from confined outside areas, bearing in mind criteria of exposure to the wind in relation to their form and urban density.

**KEYWORDS:** Air quality. Confined outdoor space. CFD. Urban density. Efficiency of air renewal.

### 1. Introducción

El efecto de la renovación del aire en las áreas urbanas consiste en la mezcla de volúmenes de aire con distintas características higrotérmicas y de composición molecular, así como de los agentes contaminantes que contienen. Se produce la mezcla de un aire «limpio» procedente de áreas abiertas del entorno suburbano próximo que envuelve al entorno urbano, con el aire presente en las urbes (KIM, 2003). Esta mezcla, producto del intercambio de partículas entre volúmenes de aire contaminados con volúmenes limpios genera la renovación de la calidad del aire que depende de la velocidad del viento, entre otros factores. Con una intensidad constante de contaminación del aire en las ciudades, a mayor velocidad del viento, mayor será el caudal de aire limpio que accede al área urbana facilitando la mezcla (KASTNER-KLEIN, 2001). Sin embargo el tiempo de residencia del aire limpio en el interior del área urbana se reduce, minorando a su vez la eficiencia del proceso de renovación natural (DEPAUL, 1986). Este flujo ideal sólo se produce en el «modelo pistón», que es el caso hipotético producido por un rozamiento constante en

todas las superficies limítrofes del modelo y la ausencia de obstáculos que dificulten la trayectoria natural del flujo. El análisis de las diferentes circunstancias que se pueden dar en los entornos urbanos propiciará el conocimiento del grado de influencia de los mismos sobre la calidad del aire.

Se ha definido el aire «limpio» como aquel aire que presenta una proporción de contaminantes aceptable para su uso por parte de las personas. Si bien, su calidad dependerá de los condicionantes de las áreas suburbanas que rodean a las urbes estudiadas. Es decir, este aire de admisión a las áreas urbanas contendrá agentes externos a la natural composición del aire (partículas en suspensión, polvo, microorganismos, polen, etc.), sin embargo se considera a todos los efectos de una calidad superior al aire contenido en las áreas urbanas en condiciones estacionarias, que presenta una mayor cantidad de contaminantes procedentes de industrias, de procesos de combustión, etc. Esto es debido a que en las áreas suburbanas y rurales el aire es reciclado por procesos naturales gracias al efecto de las masas vegetales que están presentes en mayor número en estas superficies en contraste con los espacios urbanos. En el proceso de

desplazamiento de las partículas de aire en el interior de los espacios urbanos, éstas se van cargando de contaminantes y agentes nocivos para el ser humano. A mayor flujo de aire procedente de las áreas suburbanas, mayor será la calidad de ese aire al producirse el efecto de mezcla en menor tiempo, reduciendo la concentración instantánea de agentes tóxicos y contaminantes (PADILLA-MARCOS, 2015).

El fluir del aire entre edificios a través de los espacios exteriores condiciona su calidad mediante el consecuente proceso continuado de contaminación. Parámetros como la densidad de población, la presencia de industrias o el tráfico influyen notablemente sobre el proceso de degradación del aire. Situación en gran medida provocada por el aumento demográfico de los núcleos de población que precisan de un elevado número de servicios que mantengan las prestaciones que se esperan para conservar la calidad de vida de los ciudadanos. Sin embargo, las áreas verdes y una trama urbana permeable permiten mejorar sustancialmente la calidad del aire exterior que va a ser consumido por los usuarios de las ciudades y de los edificios, no sólo auspiciado por el aporte de aire «limpio» y la neutralización de contaminantes aéreos, sino derivado en gran medida de la alteración del trayecto del aire procedente de las áreas suburbanas, y que facilita su proceso de renovación por mezcla. El análisis de las diferentes circunstancias que se pueden dar en los entornos urbanos propiciará el conocimiento del grado de influencia de los mismos sobre la calidad del aire.

Denominamos «espacios exteriores confinados urbanos» a aquellos volúmenes de aire que están en mayor o menor medida confinados entre superficies edificadas y que generan la trama urbana, generalmente abiertos en sus extremos superiores (SKOTE, 2005) y que permiten el desplazamiento de las partículas de aire de forma más o menos tortuosa entre edificios y otros elementos urbanos. Estos espacios proveen de aire «limpio» a los espacios habitables del interior de los edificios y renuevan el aire «viciado» que se desprende de ellos.

Para el presente trabajo se ha optado por limitar la definición de estos espacios según su posición con respecto a los elementos construidos, acotándose lateralmente por los planos envolventes de los edificios contiguos y cuya elevación asciende hasta la cota de cornisa del edificio más alto de entre los que conforman el espacio exterior (ver FIG. 01). El conjunto de los espacios exteriores confina-

dos conforma el «perfil urbano». El estudio de los patrones de calidad del aire en estos espacios se orienta hacia el análisis de su comportamiento con respecto a la influencia que sobre él tienen los agentes aerodinámicos en las ciudades. Objetivamente, los espacios exteriores que por su constitución dispongan de una menor superficie de contacto con el aire libre, serán los espacios exteriores que mayores dificultades presenten a la renovación eficiente del aire en su interior debido a su diseño (ver FIG. 02 y 03).

La ventilación consistente en la toma del aire exterior, como medio de dilución de las partículas nocivas presentes en el aire en el interior de los locales habitables, requiere de espacios exteriores que garanticen su calidad. Esto se consigue mediante espacios exteriores abiertos de manera suficiente al aire libre que por sus condiciones constructivas y geométricas propicien su intercambio o mezcla. El aire exterior en su libre discurrir se ve afectado de múltiples variables en las áreas rurales, suburbanas y urbanas que condicionan su comportamiento dinámico y cinemático a desarrollarse dentro de las ciudades. Estas variables alteran su dispersión, variando la calidad del aire entre los diferentes espacios exteriores, corredores y vacíos edificatorios (KIM, 1999; VARDOULAKIS, 2003). Se puede decir que la calidad del aire final que es introducido en los edificios para su ventilación depende de:

- la confluencia de las condiciones de salubridad del aire en su origen (áreas suburbanas);
- la polución, tipo y concentración de contaminantes emitidos en el área urbana;



FIG. 1/ Definición gráfica de «espacio exterior confinado urbano»

Fuente: Elaboración propia a partir del concepto de espacio exterior

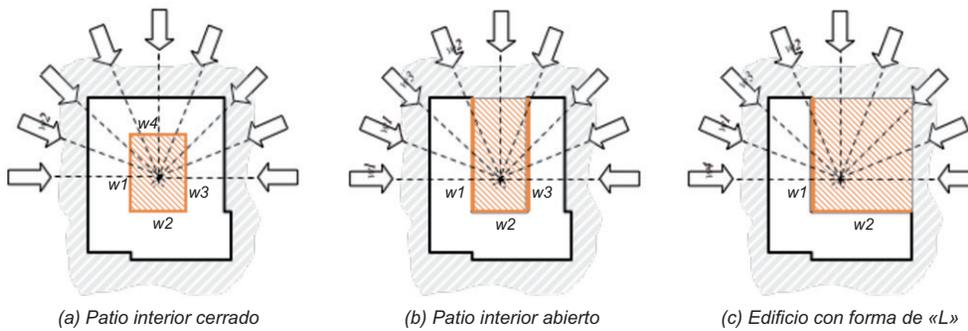


FIG. 2/ Influencia del viento sobre el espacio exterior: patios. Sección horizontal

Fuente: Elaboración propia a partir del concepto de patio

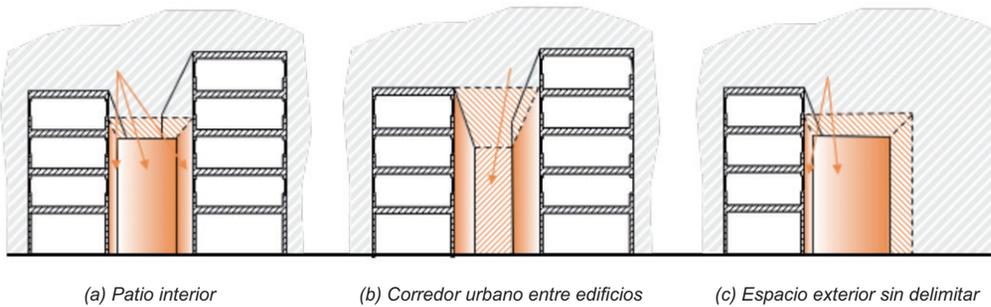


FIG. 3/ Configuración constructiva de diferentes espacios exteriores según su grado de confinamiento

Fuente: Elaboración propia a partir del concepto de patio

- la trayectoria o el recorrido característico que ha seguido una porción de aire desde su entrada en el área urbana hasta su salida, incluyendo el tiempo de residencia en los espacios interiores y
- la capacidad del espacio exterior urbano que alimenta a los habitáculos para intercambiar el aire con la corriente libre.

## 2. Calidad y eficiencia de la renovación del aire exterior

La eficiencia de la renovación del aire contenido en los espacios se define mediante el concepto de «edad del aire». Este concepto nos permite relacionar la trayectoria y el desarrollo que sigue cada partícula de aire en movimiento en el interior de un modelo con el tiempo que permanece en su interior. Es decir, permite conocer el tiempo de residencia del conjunto de partículas de aire (SANDBERG, 1993; ETHERIDGE, 1996).

Este concepto de edad del aire puede ser empleado en sistemas más complejos como los espacios exteriores asimilando un modelo urbano a un modelo limitado y acotado a modo de gran espacio interior. Las condiciones de contorno de este espacio han de ser conocidas y aplicadas en igualdad de condiciones como si se tratara de un espacio interior, asumiendo que el aire ha de acceder y salir libremente del modelo pero identificando los límites virtuales por los que se produce este hecho.

La experimentación de la edad del aire en espacios abiertos de gran envergadura es difícil de llevar a cabo debido a la reducida capacidad de control y seguimiento de las partículas de gases trazadores en estos entornos. Se requieren elevados caudales de emisión de gases trazadores para que las concentraciones sean correctamente muestreadas por los equipos de medida. Este tipo de ensayos se vuelven factibles en las experiencias a escala en las que se gestionan las emisiones y se valoran las concentraciones

por cualquiera de los métodos válidos indicados por Hang & al. (HANG, 2009a) (Ecuaciones 1-3). De igual modo su simulación en aplicaciones CFD son hoy un hecho para valorar la calidad del aire de los espacios exteriores (HANG, 2009a; 2009b), asimilando las condiciones de contorno del túnel simulado a las condiciones de contorno de un espacio interior.

$$\bar{\tau}_\rho = \frac{c}{m} \tag{1}$$

$$Q_\infty = \int_A U_\infty dS \tag{2}$$

$$\bar{\tau}_\rho^* = \frac{\bar{\tau}_\rho \cdot Q_\infty}{V} \tag{3}$$

Dónde:  $\bar{\tau}_\rho$  es la edad media puntual del aire;  $\bar{\tau}_\rho^*$  es la edad media puntual normalizada del aire;  $c$  es la concentración puntual (kg/kg);  $m$  el índice de emisiones homogéneas;  $S$  la superficie perpendicular al flujo de aire por componentes vectoriales;  $Q_\infty$  el flujo de aire que atraviesa la superficie  $S$ ;  $U_\infty$  la velocidad del aire por componentes en la corriente libre ( $\approx U_m \cdot (\alpha + 1)$ );  $V$  el volumen de aire de la zona de control;  $U_m$  velocidad promedio del perfil;  $\alpha$  exponente determinado por el perfil exponencial equivalente de velocidades del viento.

Ahora bien, el problema de la evaluación de la edad del aire de los espacios exteriores depende del entorno urbano analizado y los límites y dependencias que se tomen en consideración dentro de un volumen de control. Volumen de control como porción de aire que por sus características o ubicación dentro de un volumen mayor permite un análisis específico. Las características dimensionales de este tipo de volúmenes para el análisis de la actitud del aire en torno a un volumen sólido han sido definidas en trabajos de investigación precedentes (PADILLA-MARCOS, 2017).

Al limitarse un volumen mayor se genera un volumen virtual paralelepípedo cuyas superficies han de satisfacer el criterio de equilibrio de flujos de la ecuación de continuidad (Ecuaciones 4 y 5), de forma que el caudal de admisión al interior del volumen de control sea el mismo que el caudal de salida. De esta forma, la edad media del volumen de aire considerado será dependiente de la edad media del aire en las áreas por las que el flujo es positivo (el aire accede al volumen de control) y la edad media del aire en las áreas por las que el flujo es negativo (sale del volumen de control) (ver FIG. 04).

$$Q = Q_i = Q_o \tag{4}$$

$$Q = \sum_n Q_{in} = \sum_n Q_{out} \tag{5}$$

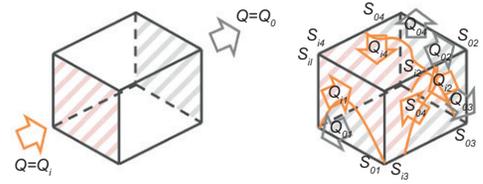


FIG. 4/ Equilibrio de flujos – ecuación de continuidad

Fuente: Elaboración propia a partir de la ecuación de continuidad

Por lo que la eficiencia del proceso de renovación del aire en un volumen determinado responde según (Ecuaciones 6-8):

$$\tau_n = \frac{V}{Q} \tag{6}$$

$$\tau_r = 2 \langle \bar{\tau}_\rho \rangle \tag{7}$$

$$\xi^a = \frac{\tau_n}{\tau_r} \leq 1 \tag{8}$$

Siendo:  $Q$  el flujo equilibrado de aire en el volumen de control;  $Q_i$ ,  $Q_o$  los flujos de aire en la entrada y en la salida;  $\tau_n$  edad del aire teórica en la salida;  $\tau_r$  edad media del aire en la salida (tiempo de residencia del aire en el volumen de control);  $\tau_\rho$  edad media del volumen de aire;  $\xi^a$  eficiencia del procedimiento de renovación del aire exterior (SANDBERG, 1981).

La edad del aire teórica en la salida dependerá del caudal que atraviesa el modelo, suponiendo éste bajo el criterio del «efecto pistón» (Ecuaciones 9-11), en el que se supone la continuidad del fluido sin afección de obstáculos que generen la formación de vórtices o movimientos turbulentos. El espacio en el que se produce el hipotético «efecto pistón» puede ser considerado como el caso ideal en el que la edad del aire se incrementa de forma progresiva y lineal en su recorrido con una edad del aire homogénea en la superficie de salida (ver FIG. 05). Esto da como resultado que la edad media del local sea la media entre la edad en la superficie de admisión y la de extracción.

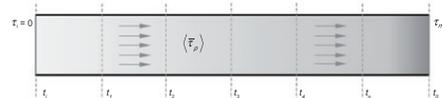


FIG. 5/ Edad del aire en el modelo «pistón»

Fuente: Elaboración propia a partir de SANDBERG, 1981

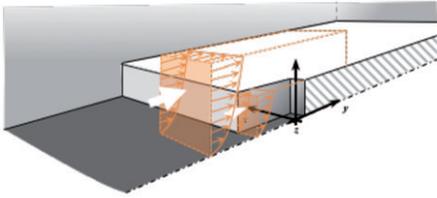


FIG. 6/ Cálculo de los caudales equivalentes

Fuente: Elaboración propia a partir del concepto de caudal equivalente

La aplicación de este concepto sobre las condiciones de contorno establecidas para modelos urbanos de aire exterior, requiere un estudio específico de la actitud del aire bajo los condicionantes de los perfiles de velocidad y turbulencia producto del libre fluir del aire y la acción del viento. En condiciones ideales, el caudal nominal circulante en un modelo se dimensiona según el caudal equivalente de la proyección perpendicular de las superficies abiertas del volumen considerado sobre el perfil de velocidades del modelo global, como proyección de la sección transversal del modelo urbano (ver FIG. 06).

$$Q_i = Q_0 = (y_2 - y_1) \cdot (z_2 - z_1) \cdot \frac{\int_{z_1}^{z_2} f(u) dz}{z_2 - z_1} \quad (9)$$

$$Q_i = Q_0 = (y_2 - y_1) \cdot \int_{z_1}^{z_2} f(u) dz \quad (10)$$

$$Q_i = Q_0 = \frac{U^*}{k} \cdot (y_2 - y_1) \cdot \left( \left[ z \cdot \ln\left(\frac{1}{z_0}\right) \right]_{z_1}^{z_2} + \left[ z \cdot \ln(z) - z \right]_{z_1}^{z_2} \right) \quad (11)$$

### 3. Configuración del Modelo CFD

El modelo se configura a una escala acorde a la validación del soporte experimental realizada a escala 1/200. El uso de modelos a escala se ha justificado sobradamente para la validación realizada sobre experiencias de campo en entornos reales (FARELL, 1999; SCHATZMANN, 1999; YOSHIE, 2007) y su simulación CFD permite el estudio del comportamiento del aire sobre modelos ideales con el fin de obtener una visión global de la relación entre el aire y los volúmenes construidos (MERONEY, 1999; LIEN, 2004; ZHANG, 2008).

El cálculo numérico supone hoy en día una herramienta capaz de simular el comportamiento del aire en modelos reales, reduciendo el costo de la experimentación «in situ» y permitiendo analizar múltiples variables que intervienen en el proceso de renovación del aire en los espacios exteriores. Ha hecho asequible el estudio del comportamiento del aire en los espacios exteriores basado en simulaciones de los principios de turbulencia del aire.

El medio físico expuesto a estudio será considerado como fluido ideal a temperatura constante sin influencia térmica o mecánica distintas de la difusión o movimiento provocado por el propio medio, sus características y los diferentes obstáculos que condicionen su libre discurrir. Esta simplificación obvia la repercusión dinámica que tendría un criterio no isotérmico

de las superficies. Este criterio condicionaría la diferencia de densidades del aire debido a su temperatura, lo que implicaría un gradiente de presiones en el modelo. Este gradiente se traduciría en desplazamientos de la masa de aire más allá de las condiciones de contorno establecidas para este trabajo.

#### 3.1. Principios físicos y numéricos

Las perturbaciones en la trayectoria del flujo de un fluido en régimen turbulento (RICHARDS, 1993; BLOCKEN, 2007; AMORIM, 2013) propicia la aparición de vórtices internos y comportamientos espectrales de diferentes dimensiones, afectados en parte por la disipación de la energía debido a su viscosidad (RICHARDS, 1993; VARDOULAKIS, 2003; XIAOMIN, 2006).

Las herramientas CFD ponen a disposición del usuario distintos modelos de cálculo para la aproximación computacional al comportamiento turbulento del aire: Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), Detached Eddy Simulation (DES), Large Eddy Simulation (LES) y Direct Numerical Simulation (DNS), entre otros (LIEN, 2004).

La selección del modelo RANS para el procedimiento de cálculo simulado de los parámetros del aire se justifica en su aproximación viable al comportamiento del fluido en los entornos urbanos bajo regímenes de turbulencia (LAUNDER, 1974).

Este modelo tridimensional aplica las ecuaciones de Navier-Stokes (Ecuaciones 12-13) ampliamente justificada su solvencia en el ámbito científico (MOONEN, 2011; HERTWIG, 2012). Así mismo, este modelo acomete todas las escalas de turbulencia no precisando de otros modelos que requieren un mayor coste computacional.

$$\bar{u}_i(x, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_i^{(n)}(x, t) \quad (12)$$

$$u_i(x, t) = \bar{u}_i(x, t) + u_i'(x, t) \quad (13)$$

Cada componente vectorial del viento en el instante  $t$  se define por:  $u_i$  la velocidad instantánea,  $\bar{u}_i$  la velocidad media y  $u_i'$  la velocidad fluctuante.

Se define un perfil de velocidades que integra el efecto pared sobre el fluido en movimiento (LAUNDER, 1974; PATERSON, 1986; BLOCKEN, 2007). El perfil de velocidades basado en la ley de correspondencia con el rozamiento entre las partículas internas del aire y entre éstas y las superficies sólidas se define por el perfil logarítmico de velocidades desarrollado por Sutton (Ecuación 14; SUTTON, 1936; SUTTON, 1937). La región en la cual el viento sigue un perfil de velocidades logarítmico se conoce como capa superficial de tensión constante cuya altura se estima en torno a los 100 metros de altitud (PANOFSKY, 1964; PANOFSKY, 1984). Este concepto es asimilable a la capa límite atmosférica cuya altura dependerá de multitud de variables dependientes del entorno y de las características del aire en cada momento.

El conjunto de variables dinámicas a definirse como condición de contorno para la admisión del aire en el modelo se simulan con las ecuaciones que desarrollan los perfiles verticales de velocidad del viento y los perfiles de energía y disipación turbulentas (Ecuaciones 14-18) para elevados números de Reynolds:

$$\tau_n = \frac{V}{Q} \quad (13)$$

$$\tau_r = 2 \langle \bar{\tau}_p \rangle \quad (14)$$

$$\xi^a = \frac{\tau_n}{\tau_r} \leq 1 \quad (15)$$

$$k = k_{nw} + \frac{z}{h_t} \left( 0.002 (U_m (\alpha + 1))^2 - k_{nw} \right) \quad (16)$$

$$\varepsilon = \frac{c_\mu^{0.75} k^{1.5}}{c_k^z} \text{ if } z \leq 0.085 h_t \quad (17)$$

$$\varepsilon = \frac{c_\mu^{0.75} k^{1.5}}{0.085 h_t} \text{ if } z > 0.085 h_t \quad (18)$$

Siendo:  $C_k$  constante de Von Karman ( $C_k \approx 0.41$ ),  $z$  cota,  $U_m$  velocidad promedio del perfil,  $\rho$  densidad del aire ( $1.204 \text{ kg/m}^3$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  $h_t$  altura del túnel,  $\mu$  viscosidad dinámica del aire ( $\mu = 1.825 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$ ),  $C_\mu$  constante empírica (determinada por LAUNDER & SPALDING (1974) cuyo valor aproximado es de 0.09) y  $k_{nw}$  energía turbulenta próxima a las paredes del túnel.

El efecto que tiene la turbulencia sobre la calidad del aire depende de la capacidad de la configuración geométrica construida para generar vórtices en aquellas zonas en las que es susceptible la producción de un mayor estancamiento del aire. Ese estancamiento tiende a producirse en aquellos puntos en los que la acción dinámica del fluido es menor que las fuerzas y tensiones mantenedoras, fricción o fuerzas convectivas. Este fenómeno es especialmente común en las áreas en rincón en las que difícilmente accede el aire o en aquellas zonas no expuestas a la acción del viento o remansos (MURAKAMI, 1999). Las fluctuaciones turbulentas que se producen en flujos adiabáticos son consecuencia de presiones diferenciales en el flujo natural del aire sobre superficies rugosas (SUTTON, 1936; TOWNSEND, 1956; KLINE, 1967), posteriormente confirmadas por SALIZZONI, 2009. Se valora la velocidad vertical de estas fluctuaciones en forma de bucle cerrado con unas magnitudes del orden del 10% de la velocidad del aire definida por el perfil del viento.

### 3.2. Validación del modelo de referencia CFD

El modelo se configura a una escala acorde a la validación del soporte experimental realizada a escala 1/200. El hecho de simplificar procedimientos complejos permite analizar casos primarios sin el elevado gasto computacional requerido para los casos simulados en los que interviene un gran número de variables. El estudio aislado de las distintas variables y condiciones de contorno que intervienen en los fluidos atmosféricos libres permite analizar la repercusión e impacto que tienen sobre el modelo arquitectónico.

Se emplea como referencia el modelo B1-2 del proyecto CEDVAL del Environmental Wind Tunnel Laboratory (EWTL) de la «Universität Hamburg» (<http://www.mi.zmaw.de/index.php?id=432>), para la obtención de los parámetros de validación de los casos simulados expuestos a estudio en el presente documento. El fin último consiste en verificar que

estas hipótesis se aproximan a los modelos previamente ensayados a escala y sirven de soporte referencial a la investigación llevada a cabo (MURAKAMI, 1999).

La base de datos de referencia CEDVAL aporta datos numéricos de velocidades del aire e índices de turbulencia resultantes obtenidos en las sondas del interior del modelo a escala 1/200. Con el fin de obtener un patrón lo más similar posible al modelo a escala de referencia, se configura un modelo de simulación bajo software CFD que recree las condiciones de contorno generadas en el modelo de túnel del viento a escala para el tipo B1-2 (ver FIG. 07), correspondiente con una matriz de 56 edificios de planta cuadrada «en anillo». Cada lateral del anillo mide 250 mm con una altura de 60 mm con un patio en su interior de planta cuadrada que recorre la totalidad de la altura del edificio y cuyos lados tienen una dimensión de 130 mm.

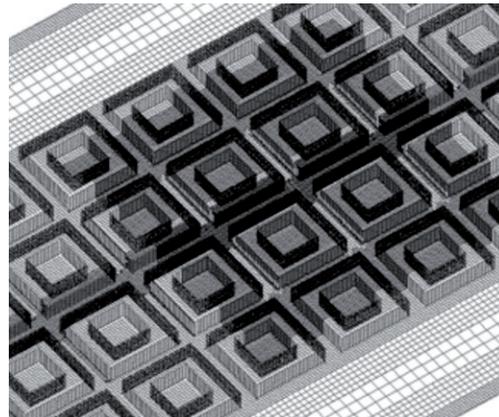


Fig. 7/ **Mallado del modelo de referencia B1-2**

Fuente: Elaboración propia a partir de simulaciones del modelo de referencia B1-2

**Validación del modelo de referencia (CEDVAL B1-2)**

El modelo de referencia para la validación en túnel del viento BLASIUS proporcionado por el Instituto de Meteorología de Hamburgo es simulado en el software CFD bajo diversos modelos de viscosidad. Se concluye que el modelo del método CFD RANS «Realizable» es el que aporta una mayor precisión de los resultados de validación para los más de 650 puntos comprobados (ver FIG. 08). Se obtiene una precisión media superior al 96%, con más del 65% de los puntos muestreados por debajo del 20% de desviación (ver FIG. 09).

El proceso de validación seguido facilita el análisis de casos de dinámica del aire en el entorno urbano a partir de las experiencias con gases trazadores y túneles de viento de tipo BLASIUS realizadas en el proyecto CEDVAL. La transposición de los principios y criterios seguidos en el ámbito experimental bajo los fundamentos de la dinámica de fluidos conlleva la adquisición de los parámetros físicos necesarios para la consecuente configuración CFD según lo aportado en la tabla (ver FIG. 10).

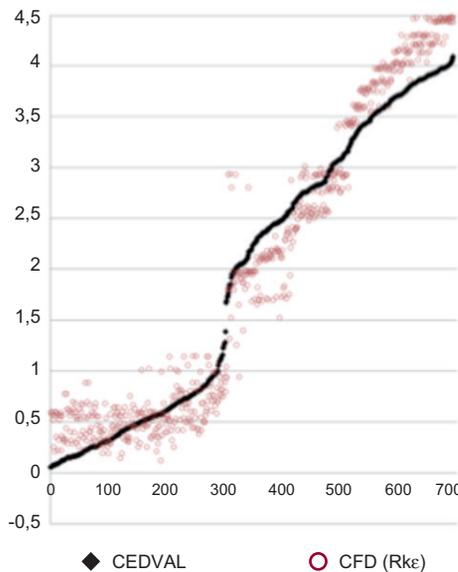


Fig. 8/ **Distribución numérica de muestras para validación.**

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de validación

Fig. 9/ **Precisión media de validación**

CFD	Modelo Realizable	precisión			
velocidad	(EWT) ± 3.68%	<5% 12.43%	5-10% 31.07%	10-20% 23.82%	>20% 32.69%

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de validación

Fig. 10/ Condiciones de contorno CFD validados.

Características del aire (fluido)		Condiciones de contorno de la admisión	
densidad del aire	1.204 kg/m <sup>3</sup>	velocidad de referencia	3.000 m/s
temperatura	293.751 K	altura de referencia	100.000 m
número de Reynolds	37250	intensidad de turbulencia	Ecuaciones 15 y 16
viscosidad cinética	1.515E-05 m <sup>2</sup> /s	disipación de la turbulencia	Ecuaciones 17 y 18
viscosidad dinámica	1.825E-06 N·s/m <sup>2</sup>	altura de turbulencia	64.000 m
		Constante de von Karman	0.410
Condiciones pared		Condiciones de contorno isotermas para el suelo	
altura de rugosidad	0.000 m	ley exponencial	0.220
altura de desplazamiento	0.000 m	velocidad de fricción	0.178 m/s
temperatura	293.751 K	altura de rugosidad	0.100 m
límites laterales y coronación definidas según condiciones de contorno en simetría		altura de desplazamiento	0.000 m

Fuente: Elaboración propia a partir de condiciones de contorno

### 3.3. Configuración del modelo numérico

La simulación numérica de la dinámica del aire en entornos abiertos es sumamente compleja, lo que

requiere la asunción de simplificaciones ampliamente demostradas y justificadas que se basan en la reducción del ámbito de estudio. Estos ámbitos se concentran prioritariamente en la limitación del dominio de simulación que requiere la definición de las condiciones de contorno necesarias para

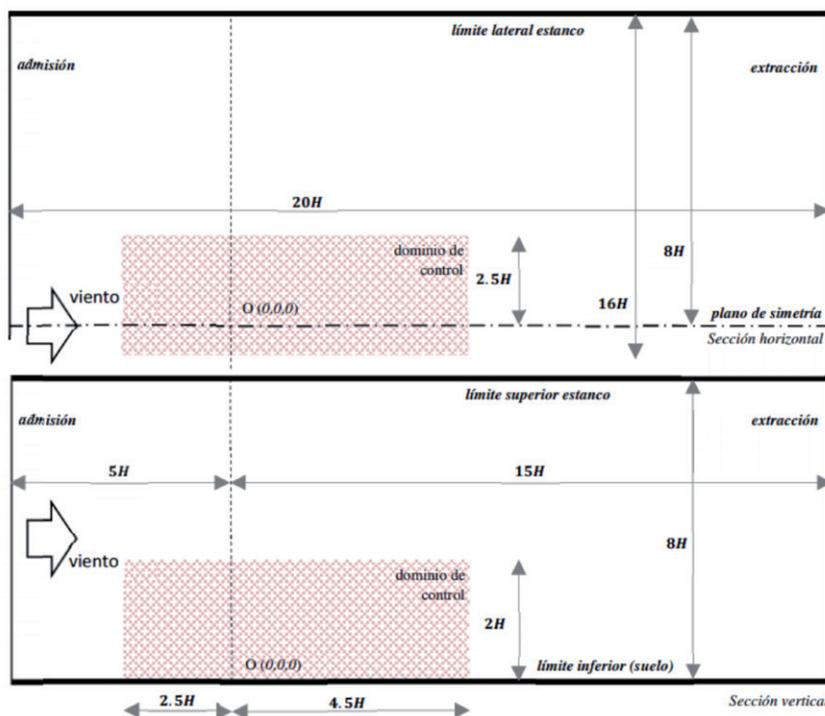


Fig. 11/ Dominio computacional

Fuente: Elaboración propia a partir de análisis previos del dominio computacional

simular un entorno mayor que afecta al dominio escogido. El dominio computacional es por tanto una pequeña fracción de un entorno urbano extenso cuyo aire contenido es directamente condicionado por el entorno que lo envuelve. El aire que acomete en el entorno delimitado lo hace con las propiedades físicas que llegan desde su difusión exterior, incluyendo partículas y otros fenómenos de turbulencia y momento provocados en su mayor parte por los obstáculos urbanos que dificultan el discurrir del aire en las ciudades.

Empleando el modelo de flujo ideal indicado (modelo pistón), se define un dominio computacional basado en una porción de aire (ver FIG. 11). Dentro del dominio computacional se define el dominio de control sobre el que se analizan los parámetros de calidad del aire previamente reseñados. Los límites virtuales del dominio de control se definen completamente permeables al aire a excepción de los límites de admisión y extracción del aire en sentido del efecto dinámico del viento, los cuales son directamente influenciados por las condiciones de contorno definidas sobre la admisión de aire al dominio computacional y que integran las propiedades del aire procedente del entorno urbano. Se aplican la influencia del perfil de viento urbano y los perfiles de turbulencia que concurren (intensidad y disipación turbulentas).

El dominio computacional es generado mediante una malla hexaédrica de hasta 2 millones de celdas en la que se aplican los criterios de efecto pared con un ratio de crecimiento máximo del 8%, con una proporción dimensional máxima entre celdas de 1:4 e interdistancia máxima de 10 cm con el fin de reducir la desviación iterativa en el interior del dominio de control.

#### 4. Resultados

El análisis de los modelos se centra en reconocer un patrón de comportamiento que permita relacionar la forma arquitectónica que adquiere el entorno urbano en los casos en los que los edificios se encuentran entre algún tipo de espacio exterior más o menos confinado y la calidad del aire que permiten proporcionar a los espacios interiores. Así se evalúa el impacto que tiene el medio urbano sobre la calidad de vida de los ocupantes de los edificios que son suministrados de aire a través de los espacios exteriores confinados.

En un primer acercamiento, se simulan ocho tipos de espacios exteriores confinados en relación a su forma y densidad urbana del entorno del espacio exterior (ver FIG. 12 y 13), manteniendo un parámetro constante: la altura de la edificación que se corresponde con la dimensión que modula el dominio. Se trata de evaluar la repercusión que tiene el aire a la exposición del viento en un entorno de confinamiento. Para ello, se modula el dominio de control en volúmenes cúbicos constantes y se obtienen los ocho casos a partir de los vacíos edificatorios que quedan de las diferentes variantes seleccionadas. De este modo se obtienen 5 grados de densidad urbana con 2 niveles de exposición al viento del espacio exterior confinado (protegido o expuesto) En la figura 12 se determinan los 5 grados de densidad urbana según la densidad superficial (superficie ocupada/superficie total) y la densidad urbana según el volumen edificado (volumen construido/volumen de aire en el dominio computacional).

FIG. 12/ Tipos de espacio exterior confinado según densidad y exposición al viento

Tipos de espacio exterior confinado según densidad y exposición al viento	Densidad urbana superficial	Densidad urbana vol. edif./vol. aire	Nivel de exposición al viento	Tipo
1	11,43 %	4 / 66 (6,1 %)	expuesto (tipo b)	G1e
2	14,29 %	5 / 65 (7,7 %)	expuesto (tipo f)	G2e
			protegido (tipo e)	G2p
3	17,14 %	6 / 64 (9,38 %)	expuesto (tipo h)	G3e
			protegido (tipo g)	G3p
4	20,00 %	7 / 63 (11,1 %)	expuesto (tipo d)	G4e
			protegido (tipo c)	G4p
5	22,86 %	8 / 62 (12,9 %)	protegido (tipo a)	G5p

Fuente: Elaboración propia a partir de tipos de espacio exterior confinado.

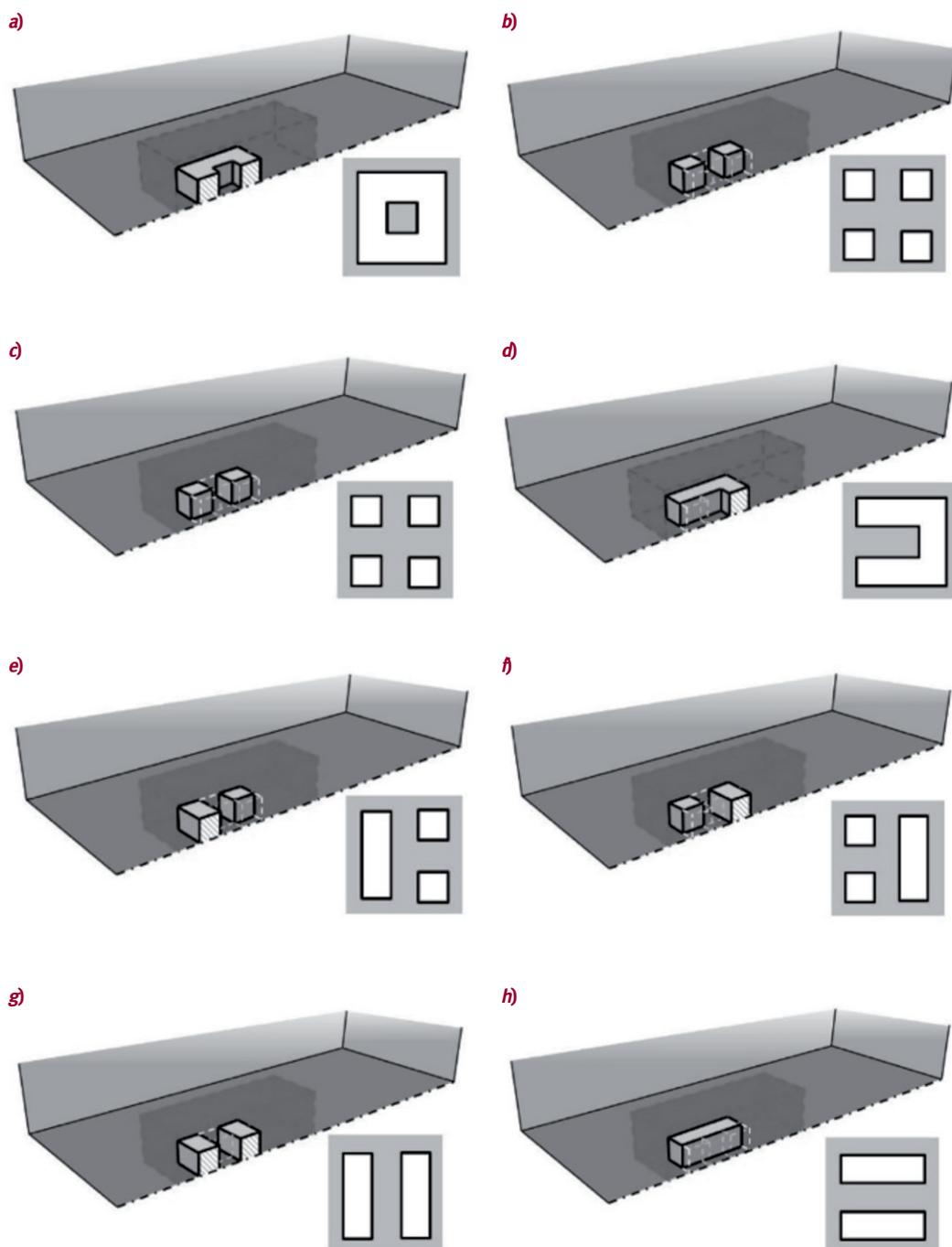


FIG. 13/ Tipos de espacio exterior confinado

- a) patio interior cerrado (G5p)
- b) cruce (G1e)
- c) patio interior abierto protegido (G4p)
- d) patio interior abierto expuesto (G4e)

- e) cruce protegido (G2p)
- f) cruce expuesto (G2e)
- g) corredor protegido (G3p)
- h) corredor expuesto (G3e)

Fuente: Elaboración propia a partir de tipos de espacio exterior confinado

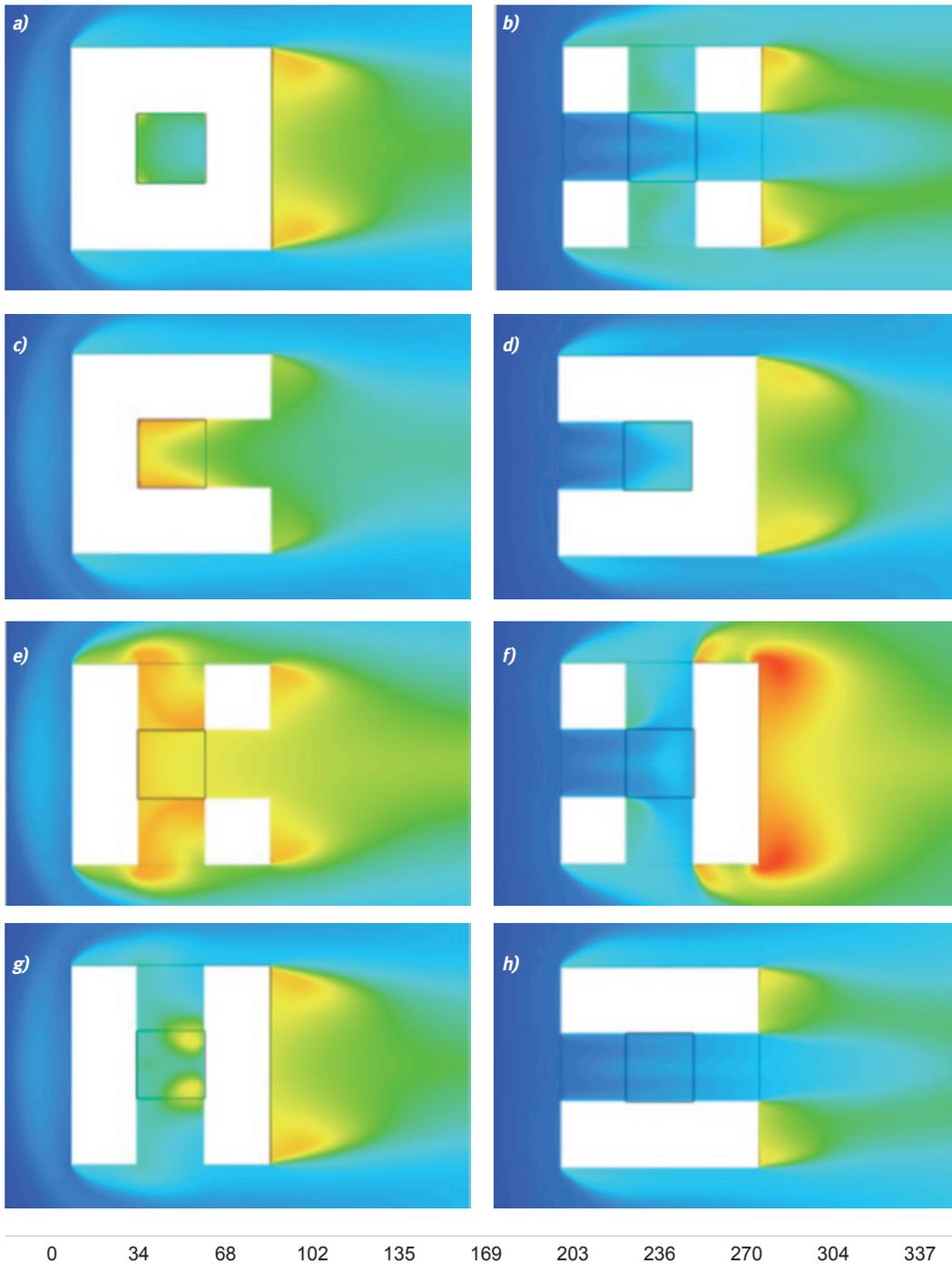


FIG. 14/ Representación de la edad del aire (s) a una cota de H/3.

- a) patio interior cerrado
- b) cruce
- c) patio interior abierto protegido
- d) patio interior abierto expuesto
- e) cruce protegido
- f) cruce expuesto
- g) corredor protegido
- h) corredor expuesto

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos

Se evalúa la capacidad de cada uno de los tipos de espacio exterior confinado para producir la renovación del aire contenido en el dominio computacional a la velocidad del viento de referencia (3 m/s), obtenida de la información meteorológica Nacional disponible. Se obtiene así el valor de edad media del aire en el dominio y la eficiencia de la renovación. Se comprueba tal y como cabría suponerse (ver FIG. 14), que tras el obstáculo edificado se produce un incremento sustancial en la edad del aire lo que supone la merma de su calidad en esos puntos. Consecuentemente, se produce un fenómeno parcial de arrastre de contaminantes (mediante la reducción de la edad del aire) en

los espacios confinados que se encuentran directamente expuestos a la acción dinámica del aire. El mayor envejecimiento del aire se produce en la fachada trasera del cruce expuesto (f), la cual se encuentra protegida de la acción eólica.

Se indican los resultados numéricos de cada uno de los modelos analizados (ver FIG. 15), que pueden ser relacionados con los distintos grados de densidad urbana que se pueden dar en las ciudades contemporáneas. Los resultados se clasifican según se trate de espacios exteriores confinados protegidos o expuestos al viento en las condiciones enunciadas.

FIG. 15/ Resultados de edades medias del aire y eficiencia de la renovación

Tipo de espacio exterior confinado	Edad media del aire en el dominio de control	Edad media del aire en el espacio exterior confinado	Eficiencia de la renovación en el dominio de control	Eficiencia de la renovación en el espacio exterior confinado
G1e	56,2 s	83,5 s	32,86 %	22,13 %
G2p	80,0 s	202,6 s	22,75 %	8,98 %
G2e	82,6 s	61,5 s	22,02 %	29,56 %
G3p	70,1 s	151,4 s	25,55 %	11,83 %
G3e	49,8 s	47,1 s	35,96 %	38,05 %
G4p	74,3 s	201,4 s	23,75 %	8,76 %
G4e	71,4 s	43,2 s	24,70 %	40,82 %
G5p	63,8 s	166,4 s	27,23 %	10,44 %

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos en las simulaciones.

## 5. Discusión de resultados

Se comprueba que el grado de densidad urbana no tiene una incidencia directa clara en los procesos de renovación del aire (eficiencia de renovación) y en la calidad del aire. Cada modelo estudiado genera un patrón propio, de forma que no se puede referenciar una ley estándar de comportamiento del aire con respecto al espacio urbano.

No obstante, sí se puede pronunciar un patrón para los espacios exteriores confinados que están expuestos directamente a la acción del viento. Los resultados (ver FIG. 16) demuestran que a mayor densidad urbana la eficiencia de la renovación se incrementa, mejorando considerablemente su capacidad de renovar el aire viciado o contaminado por mejora del efecto de distribución homogénea del aire de renovación. Por el contrario, a mayor densidad se reduce la edad

media del aire lo que sugiere un aumento del caudal al reducirse el volumen de aire disponible.

En general, los resultados alcanzados demuestran que los espacios exteriores confinados que se encuentran expuestos a la acción eólica tienen mayor predisposición a reducir la edad media del aire que contienen. Se observa que el caso más desfavorable (caso de referencia) es el correspondiente con el tipo e: cruce protegido (G2p). Se relacionan los resultados obtenidos con respecto a las edades máximas y eficiencias mínimas conseguidas en el dominio de control y en el espacio exterior confinado respectivamente (casos más desfavorables) (ver FIG. 17). Entre paréntesis se relacionan las diferencias porcentuales con respecto al caso de referencia (G2p) siendo el que en general presenta peores resultados.

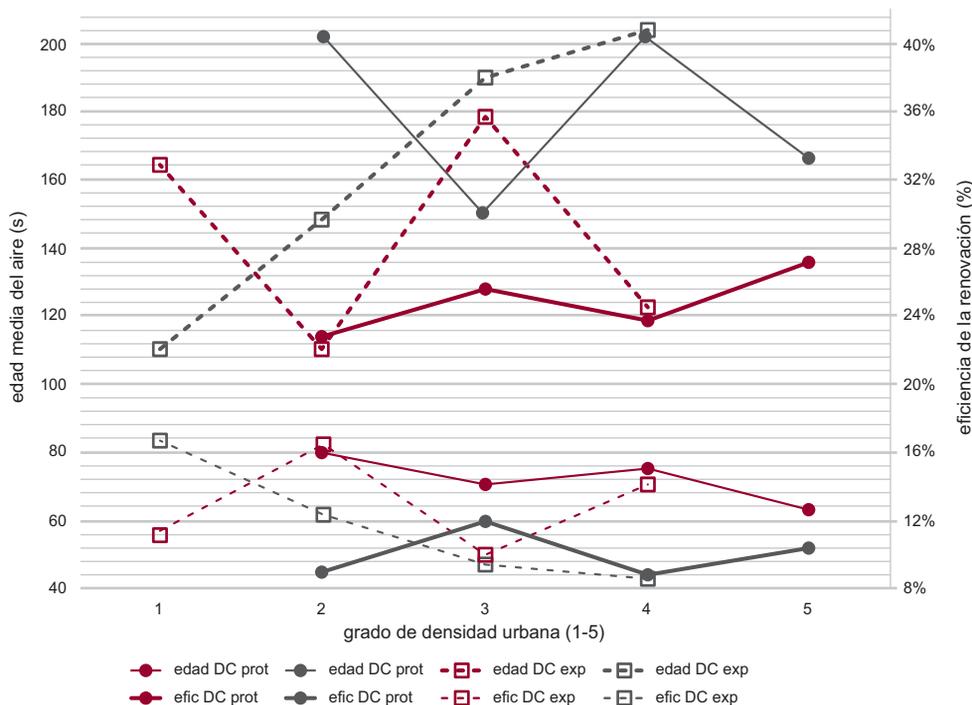


Fig. 16/ Representación de la edad media del aire (s) y la eficiencia de su renovación, según el grado de densidad urbana

Fuente: Elaboración propia a partir de la evaluación de los resultados obtenidos

Fig. 17/ Resultados de edades medias del aire y eficiencia de la renovación

Tipo de espacio exterior confinado	Edad media del aire en el dominio de control	Edad media del aire en el espacio exterior confinado	Eficiencia de la renovación en el dominio de control	Eficiencia de la renovación en el espacio exterior confinado
G1e	31,96 % (+29,75 %)	<b>58,79 %</b>	+10,84 % (+10,11 %)	+13,37 % (+13,15 %)
<b>G2p</b>	<b>3,15 %</b>	<b>202,6 s</b>	<b>+0,73 %</b>	<b>+0,22 %</b>
G2e	82,6 s (-3,25 %)	<b>69,64 %</b>	22,02 % (-0,73 %)	+20,80 % (+20,58 %)
G3p	15,13 % (+12,38 %)	<b>25,27%</b>	+3,53 % (+2,80 %)	+3,07 % (+2,85 %)
G3e	39,71 % (+37,75 %)	<b>76,75 %</b>	+13,94 % (+13,21 %)	+29,29 % (+29,07 %)
G4p	10,05 % (+7,13 %)	<b>0,56 %</b>	+1,73 % (+1,00 %)	8,76 % (-0,22 %)
G4e	13,56 % (+10,75 %)	<b>78,68 %</b>	+2,68 % (+1,95 %)	+32,06 % (+31,84 %)
G5p	22,76 % (+20,25 %)	<b>17,87 %</b>	+5,21 % (+4,48 %)	+1,68 % (+1,46 %)

Fuente: Resultados de mejora de la edad y la eficiencia relativos a las situaciones más desfavorables. En rojo, valores más desfavorables; en verde valores más favorables con respecto a los valores de referencia. Sombreado en gris, valores del caso de referencia (G2p)

La estrategia de diseño urbano tiene un importante impacto en los procesos de renovación del aire exterior y por tanto del aire suministrado a los edificios, pudiéndose mejorar con las pautas analizadas. Mejora fácilmente aplicable con modelos urbanos basados en el Tipo d: patio interior abierto expuesto (G4e) o incluso con el Tipo h: corredor urbano expuesto (paralelo a la orientación predominante del viento). Ambos casos suponen una mejora del 76,75 % y del 78,68 % respectivamente de la edad del aire en el espacio exterior confinado y del 32,06 % y del 29,29 % respectivamente de la eficiencia de la renovación en el espacio exterior, con respecto al caso más desfavorable.

## 6. Conclusiones

El fenómeno de la renovación del aire exterior en relación a la forma urbana y arquitectónica puede reducir considerablemente el consumo energético en climatización del edificio objeto de estudio. Esto supone el requerimiento de menores caudales de ventilación que suponen el incremento de la demanda energética para adaptar higrotérmicamente el aire procedente del entorno urbano a las características del aire en el interior de los edificios.

## Agradecimientos

El presente estudio ha sido elaborado gracias al soporte técnico y humano del proyecto de investigación Nacional: El espacio exterior del DB HS3 «Calidad del aire interior»: desarrollo de soluciones alternativas (referencia: VIVIENDA-26562), financiado por el Ministerio

Tal y como se ha demostrado, optar por soluciones abiertas a las orientaciones predominantes del viento en el emplazamiento supone la mejora de la calidad del aire a ser introducido en los espacios interiores de los edificios. Sin embargo, no se es capaz de definir un patrón único dependiente de la densidad urbana para todos los casos genéricos. El análisis de la calidad del aire exterior según el tiempo que pasa desde que accede al entorno urbano en una situación ideal de pureza y el tiempo que tarda en ser suministrado a los edificios permite evaluar de forma aproximada el impacto urbano sobre el proceso de ventilación interior. A mayor tiempo, se dice que tiene mayor edad y por lo tanto ha estado más expuesto a los agentes contaminantes urbanos con independencia de su fuente e intensidad. Se propone así un método genérico y simplificado para relacionar de forma estandarizada el diseño urbano con su impacto sobre la calidad del aire evaluando además la capacidad que tiene el aire circundante para provocar la necesaria renovación con el aire limpio.

En consecuencia, para los casos analizados, puede obtenerse una mejora considerable, de hasta el 78,68% en la calidad del aire que se recibe en los edificios desde los espacios exteriores confinados, atendiendo a criterios de exposición al viento en relación a su forma y densidad urbana.

de Vivienda y cuya dotación permitió realizar las simulaciones CFD presentadas. Pero en especial agradecemos los datos y series de resultados experimentales puestos a disposición por el Meteorological Institute de Universität Hamburg a través del proyecto CEDVAL para la validación del estudio y la colaboración de Dr. Bernd Leitl.

## Bibliografía:

- AMORIM, JH & al. (2013): «CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion», en: *Science of the Total Environment*, 641-642: 541-551.
- BLOCKEN, B & al. (2007): «CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings-effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow», en: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95: 941-962.
- (2007): «CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems», en: *Atmospheric Environment*, 41: 238-252.
- DEPAUL, FT & SHEIH, CM (1986): «Measurements of wind velocities in a street canyon», en: *Atmospheric environment*, 20 (3): 455-459.
- ETHERIDGE, D & SANDBERG, M (1996): *Building Ventilation Theory and Measurement*. Jhon Wiley & Sons.
- FARELL, C & IYENGAR, AKS (1999): «Experiments on the wind tunnel simulation of atmospheric boundary layers», en: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 79: 11-35.
- HANG, J & al. (2009a): «Effect of urban morphology on wind condition in idealized city models», en: *Atmospheric Environment*, 43: 869-878.
- (2009b): «Age of air and air exchange efficiency in idealized city models», en: *Building and Environment*, 44: 1714-1723.
- HERTWIG, D & al. (2012): «CFD-RANS model validation of turbulent flow in a semi-idealized urban canopy», en: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 111: 61-72.

- KASTNER-KLEIN, P & *al.* (2001): «A wind tunnel study of organised and turbulent air motions in urban street canyons», en: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89: 849-861.
- KIM, JJ & BAIK, JJ (2003): «Effects of inflow turbulence intensity on flow and pollutant dispersion in an urban street canyon», en: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91: 309-329.
- KIM, SE & BOYSAN, F (1999): «Application of CFD to environmental flows», en: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81: 145-158.
- KLINE, SJ & *al.* (1967): «The structure of turbulent boundary layers», en: *Journal of Fluid Mechanics*, 30: 741.
- LAUNDER, BE & SPALDING, DB (1974): «The numerical computation of turbulent flows», en: *Computer methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3: 269-289.
- LIEN, FS & *al.* (2004): «Simulation of mean flow and turbulence over a 2D building array using high-resolution CFD and a distributed drag force approach», en: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92: 117-158.
- & YEE, E (2004): «Numerical modelling of the turbulent flow developing within and over a 3-d building array, part I: A high-resolution Reynolds-Averaged Navier–Stokes approach», en: *Boundary-Layer Meteorology*, 112: 427-466.
- MERONEY, RN & *al.* (1999): «Wind-tunnel and numerical modeling of flow and dispersion about several building shapes», en: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81: 333-345.
- MOONEN, P & *al.* (2011): «Evaluation of the ventilation potential of courtyards and urban street canyons using RANS and LES», en: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99: 414-423.
- MURAKAMI, S & *al.* (1999): «CFD analysis of wind climate from human scale to urban scale», en: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81: 57-81.
- PADILLA-MARCOS, MA & *al.* (2015): «Eficiencia isoterma de los modelos de ventilación exterior en patios de edificios residenciales. Estudio de casos», en: *Informes de la Construcción*, 67(540): e121.
- (2017): «The effects of wind velocity and building geometry on air change efficiency in light shafts. Case studies», en: *Building Services Engineering and Technology*, 37: 5-20.
- PANOFSKY, HA & DUTTON, JA (1984): *Atmospheric Turbulence*, Wiley-Interscience, N.Y.
- (1964): «Change of Terrain Roughness and the Wind Profile», en: *Quarterly Journal. Royal Meteorology Society*, 90: 147-155
- PATERSON, DA & APELT, CJ (1986): «Computation of wind flows over three-dimensional buildings», en: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 24: 193-213.
- RICHARDS, PJ & HOXEY, RP (1993): «Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-e turbulence model», en: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46-47: 145-153.
- SALIZZONI, P & *al.* (2009): «Influence of wall roughness on the dispersion of a passive scalar in a turbulent boundary layer», en: *Atmospheric Environment*, 43: 734-748.
- SANDBERG, M (1981): «What is ventilation efficiency?», en: *Building and Environment*, 16(2): 123-135.
- & SJÖBERG, M (1993): «The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms», en: *Building and environment*, 18: 181-197.
- SCHATZMANN, M & LEITL, B (2011): «Issues with validation of urban flow and dispersion CFD models», en: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99: 169-186.
- SKOTE, M & *al.* (2005): «Numerical and experimental studies of wind environment in an urban morphology», en: *Atmospheric Environment*, 39: 6147-6158.
- SUTTON, OG (1936): «The Logarithmic Law of Wind Structure near the Ground», en: *Quarterly Journal. Royal Meteorology Society*, 62: 124-127.
- (1937): «The Logarithmic Law of Wind Structure near the Ground. 2», en: *Quarterly Journal. Royal Meteorology Society*, 63: 105-107.
- TOWNSEND, AA (1956): *The structure of turbulent shear flow*. Cambridge University Press.
- VARDOULAKIS, S & *al.* (2003): «Modelling air quality in street canyons: a review», en: *Atmospheric Environment*, 37: 155-182.
- XIAOMIN, X *al.* (2006): «The impact of urban street layout on local atmospheric environment», en: *Building and Environment*, 41: 1352-1363.
- YOSHIE, R & *al.* (2007): «Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan», en: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95: 1551-1578.
- ZHANG, A & GU, M (2008): «Wind tunnel tests and numerical simulations of wind pressures on buildings in staggered arrangement», en: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96: 2067-2079.